

Eemeli Ikonen

Vaimenninkumin hystereesi

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Kone- ja tuotantotekniikka

Insinöörityö

13.5.2013

Tekijä Otsikko	Eemeli Ikonen Vaimenninkumin hystereesi
Sivumäärä Aika	32 sivua + 1 liite 13.5.2013
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Kone- ja tuotantotekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Automaatiotekniikka
Ohjaaja	Lehtori Jari Savolainen
<p>Tämän insinöörityön tavoitteena on selvittää minkälainen laitteisto Metropolia Ammattikorkeakoululle tulisi hankkia, jotta vaimenninmateriaaleina käytettävien erilaisten kumiseosten hystereesin mittausta voitaisiin koestaa.</p> <p>Työssä käydään läpi kumin eri ominaisuuksia sekä sen valmistusmenetelmiä, jotka vaikuttavat huomattavasti kumimateriaalin ominaisuuksiin. Työ selvittää Beckhoffin logiikkaohjelmointiohjelmiston avulla suoritettavan mittauksen periaatteita ja selvittää hystereesin koestusta simulointiesimerkin avulla.</p> <p>Tuloksena saatiin selville yksinkertaistettu tietopaketti elastisen materiaalin hystereesistä sekä voimalaskelmat tarvittavan koestuslaitteiston hankkimiseksi.</p>	
Avainsanat	plastinen, elastinen, kumi, hystereesi, twincat

Author Title	Eemeli Ikonen Damper Rubber Hysteresis
Number of Pages Date	32 pages + 1 appendix 13 May 2013
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Mechanical Engineering
Specialisation option	Automation Technology
Instructor	Jari Savolainen, Lecturer
<p>The objective of this Bachelor's thesis was to study what kind of equipment is needed to analyze material hysteresis in rubber.</p> <p>Rubber is often used as a dampening material. Firstly, this thesis clarifies the different elastic properties of rubber as material and examines various production methods used to make rubber. This thesis also introduces the Beckhoffs TwinCAT logical control software system and how it is possible to simulate rubber hysteresis with a PC as a real-time PLC controller.</p> <p>As a result, this thesis offers a simple information package how to demonstrate and analyze elastic material hysteresis. In addition, this study provides information on different components needed to simulate rubber dampening.</p>	
Keywords	plastic, elastic, rubber, hysteresis, twincat

Sisällys

Lyhenteet ja sanasto

1	Johdanto	1
2	Teoria	2
2.1	Kumi vaimenninmateriaalina	2
2.1.1	Luokittelu ja kumin ominaisuudet	4
2.1.2	Kumin koestusmenetelmät	5
2.1.3	Kumin valmistus	6
2.2	Elastisen materiaalin käyttäytyminen kuormituksessa	7
2.2.1	Hystereesi ja sen kuvaus materiaalimallin avulla	7
2.2.2	Ramberg-Osgoodin materiaalimalli	8
2.2.3	Kappaleeseen kohdistuva toistuva veto- ja puristuskuormitus	10
3	Beckhoff	11
3.1	Yritystoiminta	11
3.2	Beckhoff TwinCAT	11
3.2.1	TwinCAT System Manager	13
3.2.2	TwinCAT I/O	14
3.2.3	TwinCAT PLC Control	15
3.2.4	TwinCAT NC PTP, -I ja -CNC	19
3.2.5	TwinCAT ScopeView	20
4	SinusDrive	20
5	Lineaarinen servomoottori	23
5.1	Toimintaperiaate	24
5.2	Synkronisen lineaarimoottorin rakenne	25
5.3	Beckhoff AL20xx ja AX2xxx	26
5.4	Servon mitoitus ja mahdollinen kiinnitys	27
6	Yhteenveto	29
	Lähteet	30
	Liite 1. Hystereesin mitta	

Lyhenteet ja sanasto

Boolean	Tietotekniikassa käytetty muuttujatyyppi jolle voidaan antaa arvot "TRUE tai FALSE".
BK8100	Beckhoffin kehittämä väyläkytkentäkomponentti. [8]
BR	"Butadiene Rubber", butadienikumi.
CANopen	Automaatiotekniikassa kommunikaatio-protokollaa ja laiteprofiili määrittelyä sulautetuissa järjestelmissä. [7]
CFC	"Continuous Function Chart", sekvenssikaavion ja toimintalohkokaavion välimuoto, joka on kansainvälisen IEC-61131-3 standardin mukainen logiikkaohjelmointikieli. [7]
CNC	"Computerized Numerical Control", tietokoneistettu numeerinen ohjaus tarkoittaa muistilla varustetun työstökoneen ymmärtämää symbolista ohjauskieltä. [7]
COM-väylä	"Component Object Model", binääriiliityntästandardi ohjelmakomponenteille. [7]
CPU	"Central Processing Unit", tietokoneen prosessori, joka suorittaa tietokoneelle annettuja käskyjä ja laskutoimenpiteitä. [7]
CR	"Chloroprene Rubber", kloropreenikumi.
Debug	Tietokonekielen ohjelmoinnin osaa, jossa ohjelmasta löytyvät virheet pyritään paikallistamaan ja korjaamaan. [7]
DeviceNet	Automaatiotekniikassa kommunikaatio-protokollaa. [7]
DIN-kisko	Sähkö-, elektroniikka- ja automaatioasennuksessa käytettäviä standartoidut mekaaniset kiskot, joihin voidaan asentaa komponentit paikoilleen riviin. [7]

DLL	"Dynamic-Link Library", dynaamisesti linkitettävä ja jaettava kirjasto, jota esimerkiksi Microsoft Windows hyödyntää. [7]
DP-RAM	"Dual-ported Random Access Memory", tietokonemuisti, jota voidaan lukea ja kirjoittaa useasti samaan aikaan. [7]
Elastinen	Mikäli kappale palaa rasituksen jälkeen alkuperäiseen muotoonsa on kyseessä elastinen eli kimmoisa materiaali. [2, 7]
EPM	"Ethylene Propylene Rubber", eteeni-propeenikumi.
EtherCAT	Avoin korkean suorituskyvyn omaava Ethernet:iin perustuva kenttäväylä. [7]
Ethernet	Pakettipohjaisen lähiverkkotekniikan tuoteperhe. [7]
FBD	"Function Block Diagram", toimintalohkokaavio on kansainvälisen IEC-61131-3 standardin mukainen logiikkaohjelmointikieli. [6]
FPM	"Fluorinated Propylene Monomer", fluorikumi.
I/O	"Input / Output", tulot / lähdöt.
IEC	International Electrotechnical Commission on kansainvälinen sähköalan standardiorganisaatio, joka laatii laite- ja materiaalivaatimukset sähkö- sekä elektroniikkainstrumentteihin. [7]
IIR	"Isobutylene isoprene rubber", butyylikumi.
IL	"Instruction List", käskylista on kansainvälisen IEC-61131-3 standardin mukainen logiikkaohjelmointikieli. [7]
Interbus	Sarjaväylä-tekniikka, joka siirtää automaatiokomponenttien välillä tietoa. [7]
IP	Sähkölaitteiden luokitusjärjestelmä tiiviyden määrittämiseksi.

IPC	"Inter-Process Communication", tarkoittaa menetelmäjoukkoa, joiden avulla on mahdollista lähettää ja vastaanottaa digitaalista dataa yhden tai useamman prosessin välillä. [7]
IR	"Isoprene Rubber", isopreenikumi.
ISO	"International Organization for Standardization", kansainvälinen standardijärjestö.
LD	"Ladder Diagram", relekaavio on kansainvälisen IEC-61131-3 standardin mukainen logiikkaohjelmointikieli. [7]
Lightbus	Kenttäväylä, joka hyödyntää optista kuitua tiedonsiirrossa ja komponenttien välisessä kommunikoinnissa. [7]
LIM	"Linear Induction Motor", lineaarinen induktiomoottori.
LSM	"Linear Synchronous Motor", lineaarinen synkronimoottori.
Myötöraja	Rasituksen alaisen kappaleen ylittäessä myötörajan, siihen syntyy pysyvä muodonmuutos. Myötörajan tunnus on R_e . [7]
Murtoraja	Rasituksen alaisen kappaleen ylittäessä murtorajan, voimantarve muodonmuutokseen vähenee ja materiaali murtuu rasitusta jatkettaessa. Murtorajan tunnus on R_m . [7]
NBR	"Nitrilene Butadiene Rubber", nitrilikumi.
NC	"Numerical Control", numeerinen ohjaus tarkoittaa työstökoneen ymmärtämää symbolista ohjauskieltä. [7]
NC-I	"Numerical Control Interpolation", numeerisen ohjauksen interpolaatio eli työstökoneen kahden pisteen välinen työstö joko lineaari- tai ympyränkaarirataa pitkin. [6]
NR	"Natural Rubber", luonnonkumi.

OCX	“Object Linking and Embedding Control eXtension”, on tapa kehittää ja käyttää mukautettuja käyttöliittymäelementtejä. [7]
OPC	“Object Linking and Embedding for Process Control”, on avoimeen tiedonsiirtoon perustuva standardi. [7]
PC	”Personal Computer”, tietokone.
Plastinen	Mikäli kappale ei palaa rasituksen jälkeen alkuperäiseen muotoonsa on kyseessä plastinen, eli kimmoton materiaali. [2, 7]
PLC	”Programmable Logic Controllers”, ohjelmoitavat logiikat.
Polymeeri	Materiaali jossa suurmolekyylit ovat liittyneet yhteen. [2, 7]
POU	”Program Organization Unit”, logiikkaohjelmoinnissa järjestelmät koostuvat ohjelmista (program), funktiolohkoista (function block) ja funktioista (function), jotka on nimetty ohjelman järjestelmälohkoiksi. [7]
Profibus DP	Yksi markkinoita johtavista kenttäväylä-kommunikaatio protokollista automaation sensoreille ja toimilaitteille. [7]
Profibus MC	Liikkeen tunnistukseen tarkoitettu kenttäväylä-kommunikaatio protokolla. [6]
Profinet	Avoin teollisuus Ethernet-standardi automatiikassa. [6]
PTP	”Point-to-Point”, pisteohjaus.
Q	”Silicone Rubber”, silikonikumi.
SBR	”Styrene-Butadiene Rubber”, styreeni-butadieenikumi.
SERCOS-liitäntä	”Serial Real-Time Communication System”, standardisoitu avoin tiedonsiirto liitäntä teollisuuden komponenteille. [7]

SFC	"Sequential Flow Chart", sekvenssikaavio on kansainvälisen IEC-61131-3 standardin mukainen logiikkaohjelmointikieli. [7]
SMB	"System Management Bus", järjestelmänhallintaväylä.
Sulautettu järjestelmä	"Embedded System", tarkoittaa tietokoneen ja siihen liitettyjen laitteiden saumattomasti toimiva järjestelmä. [7]
ST	"Structured Text", strukturoitu teksti on kansainvälisen IEC-61131-3 standardin mukainen logiikkaohjelmointikieli. [7]
TCP/IP	Transmission Control protocol / Internet protocol on usean Internet-liikennöinnissä käytettävän tietoverkkoprotokollan yhdistelmä. IP-protokolla on alemman tason protokolla, joka vastaa päätelaitteiden osoitteistamisesta ja pakettien reitittämisestä verkossa. Sen päällä voidaan ajaa useita muita verkko- tai kuljetuskerroksen protokollia, joista TCP-protokolla on yleisin. [7]
TPE	"Thermoplastic Elastomer", termoelasti.
TPO	"Thermoplastic Olefin, polyolefiinit.
TPU	"Thermoplastic Polyurethane", termoplastinen uretaanielasti.
UPS	"Uninterruptible Power Supply", takaa tasaisen virransyötön lyhytkestoisten katkoksien ajaksi näin poistaen riskin järjestelmän äkilliseen pysähtymiseen. [7]
USB	"Universal Serial Bus", sarjaväyläarkkitehtuuri tietokoneeseen liitettävien oheislaitteiden kytkemiseksi. [7]

1 Johdanto

Insinööriyön tarkoituksena oli selvittää voitaisiinko Metropolia Ammattikorkeakoulun materiaali- ja automaatiotekniikan laboratorioon kehittää tai ostaa valmis laite, jolla pystyttäisiin tutkimaan elastisen materiaalin vaimennus- ja hystereesiominaisuuksia. Tutkittavana vaimenninmateriaalina tultaisiin käyttämään erilaisia kumi- ja kumin seosmateriaaleja, jotka vaimentavat hyvin mekaanista iskuja. Insinööriyö perustuu kirjallisuudesta kerättyihin tietoihin materiaalin hystereesistä ja sen mahdollisesta mittaussuunnitelmasta.

Työn tavoitteena oli selvittää, millä tavalla laitteisto koulun tulisi hankkia, jotta hystereesin mittaaminen onnistuisi. Hystereesiä tultaisiin mittaamaan Beckhoffin kehittämässä TwinCAT-logiikkaohjelmointiympäristössä, joten oli luontevaa etsiä koestuslaitteeksi sopiva Beckhoffin oma lineaariservo, jolla rasitus tultaisiin toteuttamaan käytännössä. Mittauksessa käytettäisiin myös Beckhoffin valmistamia komponentteja, joiden analogiatulojen kautta saatava data olisi mahdollista saada graafiseen muotoon. Mittaustietojen perusteella pystyttäisiin laskemaan materiaalin ominaishystereesi eli lämpöhäviö. Varsinaista koelaitteistoa työssä ei ryhdytty rakentamaan, joten lineaariservon toimintaa pyrittiin simuloimaan TwinCATillä Beckhoffin suunnitteleman simulaatio-ohjelmalla.

Insinööriyön ensimmäinen osa käsittelee teknisen kumin eri ominaisuuksia ja valmistusmenetelmiä. Kumin valmistusprosessissa käytettävät materiaalit ja seosaineet sekä valmistustapa määräävät kumin erikoisominaisuudet, joita työssä on käyty kumin vaimennusominaisuuksia silmällä pitäen läpi. Luvussa käsitellään myös plastisen ja elastisen materiaalin hystereesi-ilmiötä eli materiaalissa tapahtuvaa lämpöhäviötä rasituksen alaisena.

Toinen osa insinööriyöstä käsittelee Beckhoffin TwinCAT-logiikkaohjauksen periaatteita. Ohjelma on suunniteltu teollisuuden automaation käyttöön ja se sisältää liikkeenohjauksen lisäksi useita liitännäisiä, joista tämän työn kannalta tärkeimmät on otettu huomioon.

Kolmannessa osassa on käyty läpi mahdollisen koululle hankittavan lineaariservon toimintaa Beckhoffin SinusDrive-simulaatio-ohjelmalla. SinusDrive on kehitetty

mallintamaan sinimuotoisen käyrän mukaista liikerataa, jossa tarkasteltava asema on kokoajan toistuvassa liikkeessä. Tämä vastaa hyvin pitkälle hystereesin mittauksessa käytettävää lineaariservon liikerataa, joka vaihtokuormittaa tarkasteltavaa kumikappaletta.

Hyvin usein teollisuudessa lineaarinen liike on toteutettu muuttamalla sähkömoottorin pyörivä liike lineaariseksi erilaisiin mekaanisiin ratkaisuihin turvautuen. Työn neljäs kappale käy läpi lineaariservon tuomia mahdollisuuksia teollisuuden automaatiolle sekä servon toimintaperiaatteita ja sitä, miten se eroaa tavallisesta pyörivästä servomoottorista.

Viimeisessä luvussa käsitellään mahdollista hystereesin mittauksen koestuskäyttöön hankittavaa ratkaisua koululle sekä tehdään yhteenveto insinööriyöstä. Yhteenveto käsittelee asetettujen tavoitteiden täyttymistä ja siinä pyritään pohtimaan työn käyttömahdollisuuksia.

2 Teoria

Suurin osa maailmalla tuotetusta kumista päätyy autoteollisuuden käyttöön. Jopa yli 60% maailmalla tuotetusta kumista menee autojen renkaiden valmistukseen kumin jousto-ominaisuuksien sekä suuren kitkan eli pidon takia. Koneenrakennuksessa kumit ovat käytössä paikoissa, joissa tarvitaan joustavaa iskujen vaimennusta. Esimerkiksi lähes kaikkien lattiaan kiinnitettyjen työstökoneiden, pumppujen ja moottorien värähtelyä on pyritty vaimentamaan kumikerroksella. Ilman ylimääräistä vaimennuskerrosta laite saattaa ajan myötä irrota liitoksistaan tai pahimmassa tapauksessa jopa hajota. Kolmas yleinen käyttökohte on kumin käyttö tiivisteinä [14, 15].

2.1 Kumi vaimenninmateriaalina

Kumi on polymeerinen, elastomeerinen aine, joka on valmistettu polymeeriraaka-aineesta luomalla ristsidoksia orgaanisten suurmolekyylien välille. Elastomeeri tarkoittaa kappaletta, joka pystytään venyttämään vähintään kaksinkertaiseen pituuteen, ja joka rasituksen jälkeen palautuu nopeasti alkuperäiseen muotoonsa.

Kumin tilastollinen jännitys-venymä riippuvuus voidaan laskea kineettistä elastisuusteoriaa hyödyntäen olettaen, että molekyyliketjujen välillä ei ole voimia:

$$\sigma = G \left(\lambda - \frac{1}{\lambda^2} \right) = \frac{\rho RT}{M_c} \left(\lambda - \frac{1}{\lambda^2} \right), \quad (1)$$

missä σ on jännitys,

G on materiaalin leikkausmoduli,

λ on venytetyn kappaleen pituus (perustilassa $\lambda = 1$),

ρ on tiheys,

R on yleinen kaasuvakio,

T on lämpötila ja

M_c on kahden ristiliitoksen välisen molekyyliketjun pituus.

Kumin valmistuksessa käytettävien lisäaineiden takia kumeilla on erilaisia ominaisuuksia ja sopiva seos räätälöidään käyttökohteesta riippuen. Luonnosta raakakumia saadaan kumipuun maitiaisnesteestä, kuva 1, jota kutsutaan lateksiksi. Synteettisten kumien pääraaka-aineena käytetään öljyä. Kemianteollisuuden kehittymisen myötä synteettisten kumien rakenne on kemiallisesti sekä fysikaalisesti lähestulkoon sama kuin luonnonkumeilla, täten kumien lajittelu synteettisiin ja luonnonkumeihin on nykyään menettänyt merkityksensä [5, 6].



Kuva 1. Parakatsupuusta eli kumipuusta (lat. *Hevea brasiliensis*) valutetaan maitiaisnestettä [18].

2.1.1 Luokittelu ja kumin ominaisuudet

Kumin ja muovin välille on vaikeaa vetää yksiselitteistä rajaa. Itse kumit voidaan kuitenkin karkeasti lajitella kolmeen eri luokkaan; yleiskumeihin, erikoiskumeihin ja termoplastisiin elastomeereihin. Ensimmäiseen luokkaan kuuluvat luonnonkumi (NR), isopreeni- (IR) ja butadieenikumi (BR) sekä styreeni-butadieenikumi (SBR). Näille ominaista on hyvä mekaanisen iskun kestäminen, kylmissä lämpötiloissa joustaminen sekä materiaalin halpa hinta. Rengasteollisuuden käyttämistä kumilaaduista noin 77 % on luonnonkumia. Erikoiskumeja ovat muun muassa butyylikumi (IIR), nitrilikumi (NBR), kloropreenikumi (CR), silikonikumi (Q), fluorikumi (FPM) sekä eteeni-propeenikumi (EPM). Näiden lisäksi löytyy paljon eri erikoiskumiseoksia, mutta niitä valmistetaan paljon pienemmässä mittakaavassa. Erikoiskumien tyypilliseksi ominaisuudeksi on mielletty hyvä sään, öljyn tai lämmön kestävyys ja näin ollen erikoiskumien valmistus on yleiskumeja kalliimpaa. Viimeinen luokka, eli termoplastiset elastomeerit tai termoelastit sijoittuvat ominaisuuksiltaan kumien ja muovien väliin. Niitä käytetään usein seosaineina muille muoveille, kun halutaan lisätä materiaalin iskulujuutta. Yleiset käyttökohteet ovat erilaiset ruiskuvalut ja tiivisteet. Ryhmään kuuluvat polyolefiinit (TPE-O, TPO), termoplastiset polyuretaanit (TPE-U, TPU) ja termoplastiset polyesterit (TPE-E) sekä styreeni-butadieeni-lohkopolymeerit (TPE-S, SBR). Termoelastisia polymeerejä ei tarvitse vulkanoida, joten materiaalin etuna on sen kierrätysmahdollisuus [3, 6].

Muita kumin tyypillisesti tilastoitavia ominaisuuksia on jäykkyys, jota tyypillisesti mitataan puristuskokeella. Kokeessa on tärkeä varmistaa, että kumi pääsee vapaasti laajenemaan sivusuunnassa, muuten tulokseksi saadaan huomattavasti taulukkoarvoja suurempi kokoonpuristuvuutta vastaava tilavuusmoduuli. Veto- ja repimislujuusmittaukset ovat tärkeitä uusia kumiseoksia kehitettäessä. Eri kumimateriaalien kimpoamaa tarkasteltaessa voidaan suoraa käyttää vaimennusmateriaalien arvioinnissa. Mitä suurempi kumin kimpoama on, sitä suurempi mekaaninen vaimennus. Jäänöspuristumaa kumiin syntyy pitkien kuormitusaikojen ja normaalia korkeamman lämpötilan takia. Tällöin kumissa tapahtuu viskoelastista deformaatiota eli virumista, joka on ajasta riippuvainen. Pitkät kuormitusajat ja toistuva rasitus aiheuttavat kumiin myös väsymistä, joka voi ilmetä kolmella eri tavalla; kappaleen pinnalle ilmestyy pieniä halkeamia, kappaleeseen saattaa muodostua useita eri kerroksia, mitä kutsutaan kappaleen delaminoitumiseksi tai rasituksen aiheuttaman lämpötilan nousu aiheuttaa kemiallisia reaktioita materiaalissa. Adheesio tarkoittaa kahden eri materiaalin välistä vetovoimaa, jota tartuntatestimenetelmien mukaan

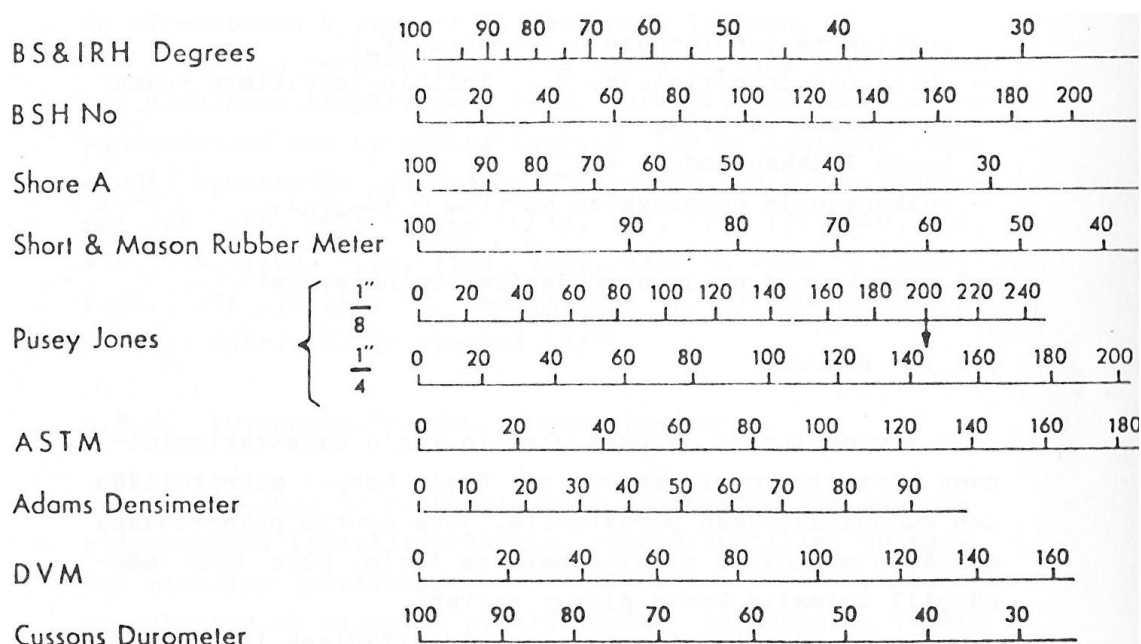
testataan vulkanoiden koekappale kiinni metallilevyyn tai kahden metallilevyn väliin ja vetämällä se irti tietyn ajan päästä [5].

Kumilaatujen tunnistamiseksi ja määrittämiseksi on kehitetty erilaisia standardeja, joiden avulla suunnittelijan on helpompi valita käyttöön tarvittava kumilaatu. Suunnittelijalle on tärkeää kumin oikeanlainen valinta käyttökohteesta riippuen. Valinnassa on otettava huomioon sijoituskohteessa vallitsevat olosuhteet ja vaimenninkumin mekaaniset vaatimukset, käytön määrä sekä muut vaatimukset kuten paloturvallisuus ja hinta. Kumituotteiden valmistajilta löytyy tietokonetaulukot ja ohjelmat, joiden pohjalta valinta on helppo tehdä täyttämällä vaadittavat hakuehdot. Standardit koskevat yleisesti kumin raaka- sekä sekoitusaineita, koemenetelmiä, toleransseja sekä valmiita tuotteita [3].

2.1.2 Kumin koestusmenetelmät

Kumin eri ominaisuuksia testattaessa näytekappaleet valmistetaan usein stanssaamalla, eli muotolaikkaamalla kumista juuri tietyn kokoinen kappale. ISO-standardin mukainen koekappale on 2 ± 0.2 , 4 ± 0.2 , 6.3 ± 0.3 tai 12 ± 0.5 mm:n kokoinen. Koestus saatetaan tehdä myös valmiille kappaleelle. Standardin mukainen koestus on määrätty tehtäväksi aikaisintaan 16h tai viimeistään 4 viikkoa kumin vulkanoinnin jälkeen. Standardin mukaan kumia koestettaessa on noudatettava myös tiettyjä tarkasti säädettyjä lämpötilaolosuhteita [4, 5].

Kovuuden mittaaminen on yksi yleisimmistä kumiin käytetyistä mittauksista. Kovuus mitataan tietyn muotoisella kärkikappaleella. Kappaletta rasitetaan määrättyllä voimalla ja mitataan tämän jälkeen materiaaliin syntynyttä jälkeä. Nykyään yleisin kumia mittaava asteikko on Shore, jolla on useita eri luokkia. Jokaisesta luokasta on eri muunnoksia eri kovuusalueiden takia. Shore-mittari on hieman kellon muotoinen käteensopiva laite. Tarkempaa testitulosta varten on olemassa telineitä, joihin mittari kiinnitetään. Mittarin pohjassa sijaitsevasta reiästä tulee ulos kärki, jonka yläpää on kuormitetun jousen varassa. Kärki painetaan kumiin, johon se osittain uppoaa ja tämän perusteella saadaan mittarilta kovuuslukema. Shore-asteikko on jaettu nolasta sataan, jossa lukema 100 vastaa äärettömän kovaa materiaalia ja lukema 0 materiaalia, johon jousi uppoaa kokonaan. Kuva 2 pyrkii havainnollistamaan eri kovuusmittausmenetelmien mittausasteikkoa ja niiden skaalautuvuutta keskenään toistensa suhteen [4, 5].

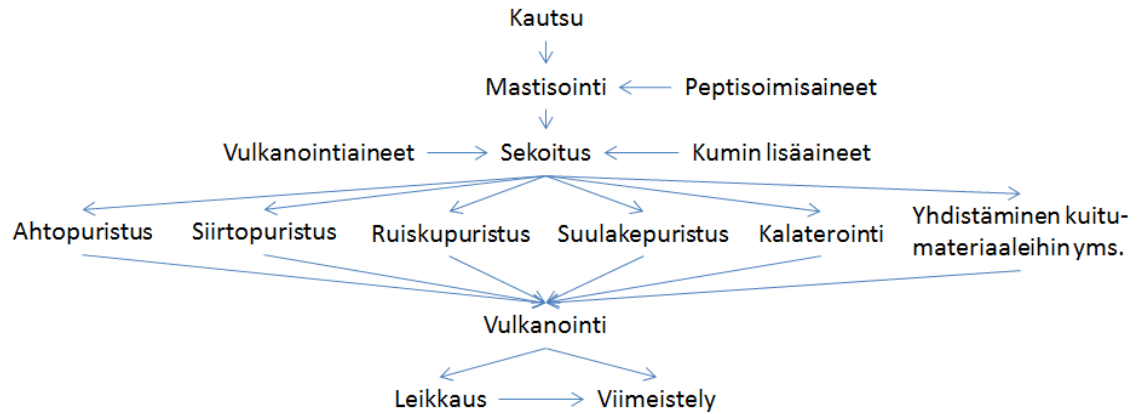


Kuva 2. Kumin kovuusmittausmenetelmien skaalautuvuustaulukko. Taulukon vasen reuna vastaa äärettömän kovaa materiaalia [5].

Kumin kovuuteen vaikuttavat kumin seosaineet. Täyteaineet yleensä lisäävät kovuutta ja pehmittimien tarkoituksena on tehdä kumista elastisempaa. Myös kumin vulkanisointi lisää materiaalin kovuutta.

2.1.3 Kumin valmistus

Kumin elastinen jousto johtuu pitkien polymeeriketjujen epämääräisestä rakenteesta. Kumikappaletta venytettäessä kemiallisesti toisiinsa liitetyt jousimaiset polymeeriketjut pääsevät suoristumaan. Sekä luonnon- että synteettisen raakakumin eli kautsun valmistus alkaa aineen viskositeetin alentamisella. Maistisoinnin tarkoituksena on pilkkoa kautsun molekyylit, jolloin kumi pehmenee sekoitusprosessia varten, jossa lisätään halutut lisäaineet sekä katalyytti. Tämä aloittaa jo vulkanointiprosessin, jota nopeutetaan kuumentamalla seosta korkeassa lämpötilassa. Vulkanoinnilla tarkoitetaan raakakumin kuumennusprosessia, jossa raakakumin ja seosaineiden kemiallisen reaktion tuloksena polymeeriketjut sidotaan toisiinsa kemiallisin liitoksien. Tämän seurauksena muun muassa materiaalin jäykkyys ja kovuus lisääntyvät. Vulkanoinnin jälkeen materiaalin sulattaminen ja uudelleenprosessointi ei ole mahdollista, joten tästä syystä kumia ei ole mahdollista kierrättää. Kuva 3 pyrkii havainnollistamaan kuminvalmistusprosessin eri vaiheita [6, 10].



Kuva 3. Kumin valmistusprosessin eri vaiheet [6].

2.2 Elastisen materiaalin käyttäytyminen kuormituksessa

Tarkasteltaessa kumia vaimennusmateriaalina on otettava huomioon kumin kimmoiset sekä plastiset ominaisuudet. Jos kappale palautuu alkuperäiseen muotoonsa poistettaessa siihen vaikuttava kuormitus ennen materiaalin murtorajan saavuttamista, sanotaan materiaalin käyttäytymistä elastiseksi. Tällöin kappale palaa alkuperäiseen jännitystilaan kulmakertoimella E eli kimmokertoimen mukaisesti. Jos kappale jää pysyvästi kuormituksen vaikutuksen alaiseen tilaan, niin kyseessä on plastinen materiaali. Mikäli kappale palautuu vain osittain, eikä täysin saavuta alkuperäistä tilaansa, puhutaan tällöin kimmoplastisesta materiaalista [2].

2.2.1 Hystereesi ja sen kuvaus materiaalimallin avulla

Kumin materiaaliset ominaisuudet eivät ole lineaariset. Yleisesti käytössä on ollut erilaisia likiarvoihin perustuvia materiaalimalleja, joilla pystytään kuvaamaan elastisen materiaalin vaimennusta. Kuormituksen alaisessa kumikappaleessa ilmenee energiahäviöitä lämmön muodossa, kuormituksen ollessa tarpeeksi suuri. Ilmiötä kutsutaan hystereesi-ilmiöksi. Mittaamalla kappaleessa tapahtuvaa energiahäviötä voidaan arvioida materiaalin vaimennusta toistuvassa rasituksessa. Käytännössä tapahtuvaa vaimennusta testataan usein kumiin kohdistetulla syklisesti toistuvalla sinimuotoisella kuormitusamplitudilla [1].

2.2.2 Ramberg-Osgoodin materiaa limalli

Pystyäksi havainnollistamaan matemaattisesti epälineaarista rasitus-venymä-käyrää (σ - ϵ -käyrä) on käyttöön hyvä ottaa Ramberg-Osgoodin materiaa limalli (kuva 4). Mallissa venymän elastinen (ϵ^e) ja plastinen (ϵ^p) osa on laskettu erikseen ja summattu keskenään, josta on saatu kokonaisvenymän kaavaksi:

$$\epsilon = \epsilon^e + \epsilon^p = \frac{\sigma}{E} + \left(\frac{\sigma}{H}\right)^{\frac{1}{n}}, \quad (2)$$

missä σ on materiaaliin kohdistuva rasitus

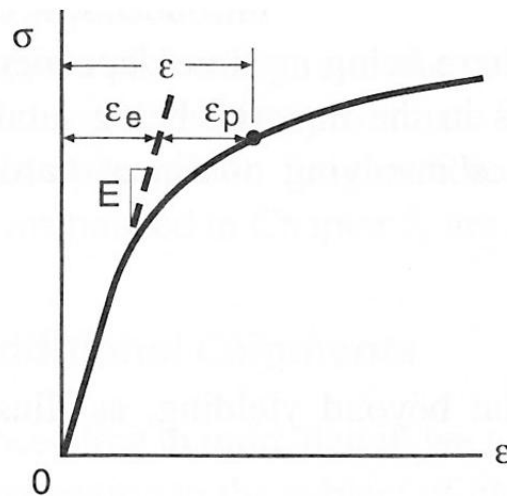
ϵ^e on materiaalin elastinen venymä

ϵ^p on materiaalin plastinen venymä

n on muokkauslujittumisekspONENTTI

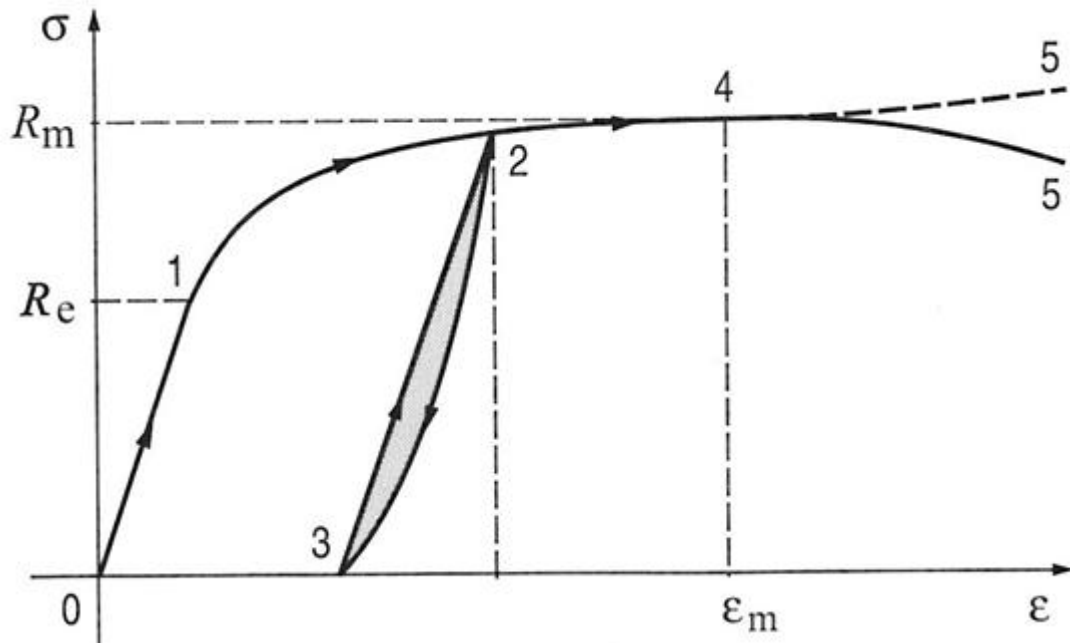
H on materiaa livakio

E on materiaalin kimmokerroin.



Kuva 4. Ramberg-Osgoodin materiaa limalli [1].

Kuva 5 pyrkii havainnollistamaan Ramberg-Osgood mallin mukaisesti, mitä kappaleelle tapahtuu rasitettaessa sitä tasaisesti kasvavalla voimalla. Kohtaan 1 asti koekappale pysyy lineaarisesti kimmoisalla alueella, mikä tarkoittaa, että kappale palautuu alkuperäiseen muotoonsa, mikäli se ei saavuta myötörajaa R_e . Myötörajan ylittyessä kappaleeseen jää pysyvä muodonmuutos [1].



Kuva 5. $\sigma\epsilon$ -käyrä, jossa tummennettu alue kuvaa hystereesisilmukkaa [2].

Kumiin kohdistuvassa toistuvassa muodonmuutoksessa eli deformaatiossa osa systeemin mekaanisesta energiasta poistuu energiahäviönä eli lämpönä. $\sigma\epsilon$ -kuvaajassa tummennettua aluetta kutsutaan hystereesisilmukaksi, jossa lämmöksi vapautuvan energian määrä on suoraan suhteessa hystereesisilmukan pinta-alaan. Tietoa pystytään hyödyntämään sovelluksissa, joissa halutaan materiaalilta sisäistä rakenteellista vaimennusta eli hystereesivaimennusta [2].

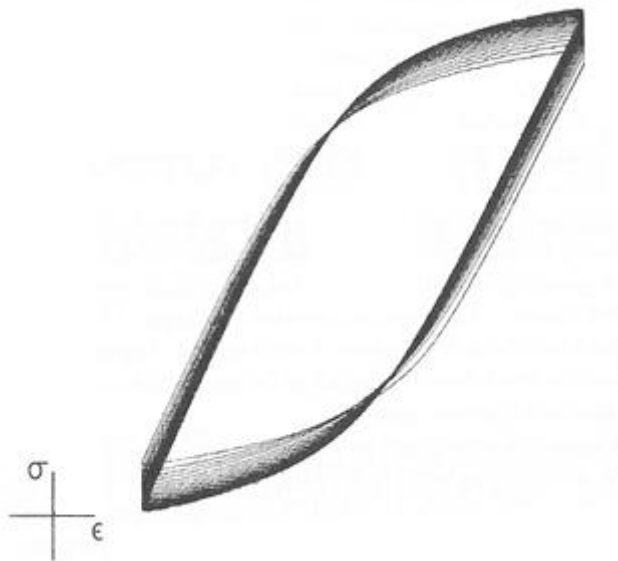
Kuvan 5 mukainen hystereesisilmukan tummennettu pinta-ala voidaan laskea, kun tunnetaan hystereesikäyrän rasitus- ja takaisinpaluukäyrän pisteet. Pisteiden mukaan voidaan luoda y-akselin suhteen funktio, joka kuvaa käyrän pisteiden sijantia. Pinta-ala saadaan integroimalla hystereesin rasituskäyrän ($y = f(x)_r$, kuvan 5 tummennetun alueen ylempi käyrä pisteestä 3 pisteeseen 2 ja x-akselin rajaama pinta-ala ja vähentämällä siitä hystereesikäyrän rasituksen jälkeisen käyrän ($y = f(x)_{rp}$, kuvan 5

tummennetun alueen alempi käyrä pisteestä 2 pisteeseen 3 sekä x-akselin rajaama pinta-ala seuraavasti:

$$A = \int_3^2 f(x)_r dx - \int_3^2 f(x)_{rp} dx \quad (3)$$

2.2.3 Kappaleeseen kohdistuva toistuva veto- ja puristuskuormitus

Vaimennin kumin käytöstä toistuvan rasituksen alaisena voidaan simuloida toistuvalla siniaaltoisella puristusvoimalla. Kappaleen koestus tehdään noin 10 - 20 Hz:n puristustaajuudella ja mitataan puristus-voima-käyrän pisteitä. Voima-rasitus-arvoja mitattaessa huomataan, että arvot piirtävät koko ajan saman muotoista silmukkaa, mikäli kappaleeseen kohdistettava kuormitus pysyy kimmoisella alueella kuten kuvassa 6.



Kuva 6. Toistuvan veto-, puristus -rasituksen alaisen kappaleen hystereesisilmukka [1].

Kuormituksen ollessa liian suuri, materiaalin murtoraja ylittyy. Tällöin materiaalin sisäinen rakenne muokkaantuu ja kappaleeseen jää pysyvä venymä. Näin ollen hystereesikäyrä ei saavuta enää lähtöpistettä, vaan jää jonkin verran jälkeen. Mikäli kappaleen kuormittamista jatketaan rasituksen ollessa liian suuri, kappale murtuu.

3 Beckhoff

3.1 Yritystoiminta

Beckhoff Automation GmbH on Saksassa perustettu automaatioalan yritys, joka tuottaa pääosin teollisuudelle suunnattuja laitteita yksittäisistä komponenteista sulautettuihin järjestelmäkokonaisuuksiin. Yrityksen tuotevalikoima koostuu muun muassa liikkeenohjaus- ja kenttäväyläkomponenteista, teollisuus-PC:stä ja ohjauspaneleistä sekä heidän kehittämästään ohjelmistokokonaisuudesta TwinCATistä. TwinCAT-logiikkaohjelmointiohjelmistolla Metropolian Ammattikorkeakoulussa voitaisiin toteuttaa hystereesin mittausta kumille sopivan lineaariservon ja sen ohjaimen avulla. TwinCAT toimisi tässä tietokoneen ja komponenttien välisenä reaaliaikaisena logiikan ohjaajana.

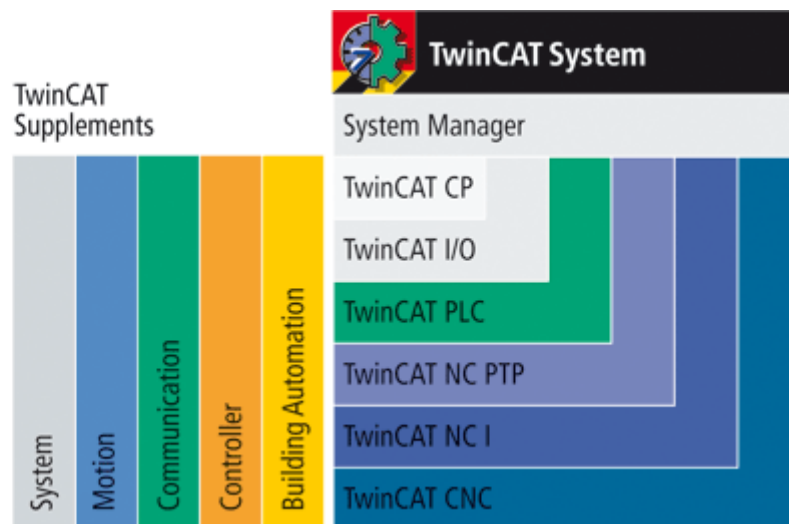
Yhtiön pääkonttori sijaitsee Saksan Verlässä, jossa on edustettuna yhtiön neljä pääosastoa. Beckhoff IPC Company on vastuussa yhtiön teollisuus-PC:istä sekä paneleista. Avoimiin standardeihin perustuvat teollisuus-PC:t täyttävät kaikki automaation valvontaa koskevat vaatimukset ja takaavat tuotteiden monipuolisen käytön. Sulautetut teollisuus-PC:t mahdollistavat IPC-komponenttien liittämisen järjestelmään yhteen suoraan DIN-kiskoille. Beckhoffin I/O-osasto suunnittelee liitäntäkomponentit tarvittavien signaaleiden ja kenttäväylien lukemiseksi. Liikkeen kontrollointi ja tunnistus osasto suunnittelee servomoottoreiden liitäntä- ja ohjauskomponentit. Ja viimeisenä automaatio-osasto ylläpitää heidän kehittämänsä TwinCAT-ohjelmistoa [13, 14].

Kasvava markkinaosuus automaatiokomponenttien valmistajana ja toimittajana on mahdollistanut Beckhoffin 30 haarakonttorin ja yli 60 laitetoimittajan ketjun perustamisen ympäri maailmaa. Beckhoffin Suomen pääkonttori sijaitsee Hyvinkäällä, jossa on edustettuna myynti, tekninen tuki, tuotekehitys, huolto ja koulutus sekä varastot. Haarakonttorit on perustettu Tampereelle ja Seinäjoelle [13, 14].

3.2 Beckhoff TwinCAT

Beckhoffin kehittämä Windows -pohjainen TwinCAT on IEC-61131-3 standardin mukainen ohjauslaitteiden ja sulautettujen järjestelmien ohjelmointityökalu. Se on tarkoitettu korvaamaan tavalliset PLC-, NC- ja CNC-ohjaimet sekä käyttölaitteet

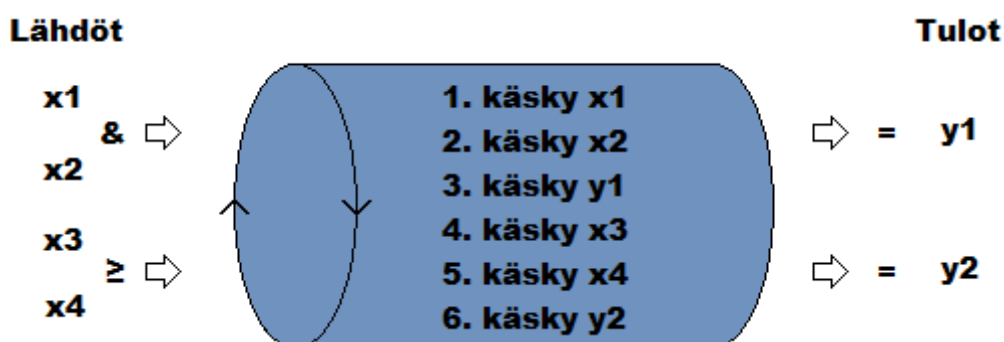
yhdistämällä nämä kaikki osaksi TwinCAT PC-logiikkaohjelmistoa. Näin saavutetaan huomattavasti suurempi laskentateho ohjelmalle käyttämällä tietokoneen prosessoria perinteisten ohjainten sijasta. Tämä mahdollistaa monimutkaisempien järjestelmien, kuten robotti- ja mittaustekniikan sekä konenäön liittämisen mukaan ilman erillisiä kalliita väyläterminaalilaitteyksiköitä. TwinCATin ominaisuuksiin kuuluvat muun muassa reaaliaikaisen PLC-ohjausjärjestelmän ja PLC-ohjelmien ohjaus, NC-akselinohjaus sekä diagnosointi- ja konfigurointityökalut (kuva 7). Uusimmassa TwinCAT 3-versiossa Beckhoff on tuonut mukaan paljon uusia parannuksia vanhaan TwinCAT 2-versioon nähden. Näitä ovat muun muassa C/C++ -kielen käyttö reaaliaikasovelluksissa, Matlab- ja Simulink-yhteys ohjelmien mallintamisen ja simuloimisen helpottamiseksi, aktiivinen usean prosessorin käyttö myös 64-bittisellä alustalla, sekä ohjelman yhdistäminen Microsoft Visual Studioon [9, 10, 16].



Kuva 7. Kaavio TwinCAT 2-ohjelmistosta ja sen liitännäisistä [17].

Beckhoff on luonut TwinCATiin mahdollisuuden liittää PC-järjestelmät ja komponenttien väyläterminaalit toisiinsa TCP/IP-protokollaa hyödyntäen. Tämä mahdollistaa TwinCATin etäkäytön ja prosessin valvonnan Internetin kautta. TwinCATin ohjelmien kommunikointi on toteutettu Microsoftin standardoimien jaettujen kirjastojen avulla, kuten DLL, OPC, OPX, yms.. Tietoa voidaan tämän vuoksi kerätä kaikilla Windows-yhteensopivilla ohjelmilla, kuten Microsoft Office tai useilla visualisointiohjelmilla, suoraan TwinCATstä käyttäen Microsoftin standardoimia liityntärajapintoja. Tämä tekee laitteen loppukäyttäjän raportoinnista helpompaa, mikäli tieto halutaan viedä muuhun ohjelmaan tuloksen tarkastelua varten [9, 10, 16].

Beckhoff mainostaa TwinCATin tekevän PC:stä reaaliaikaisen PLC-ohjausjärjestelmän. Käyttäjän luomat ohjelmat ja toimenpiteet pyritään suorittamaan mahdollisimman deterministisesti, eli tarvittavat toimenpiteet tehdään, jonkin sitä edeltävän ilmiön jälkeen, niin pian kuin mahdollista. Tarkan aikatauluikkunan mukaisesti ohjelmat suoritetaan sykleittäin itsenäisinä tehtävinä toistuvasti peräkkäin (kuva 8). Tehtäville voidaan TwinCATissa määrittää sille varattu suorituskapasiteetti, jonka avulla pyritään varmistamaan, että jokaiselle ohjelman tehtävälle on käytössä tarpeeksi prosessorin laskentatehoa. Mikäli annettu kapasiteetti ylittyy, TwinCAT antaa käyttäjälle virheilmoituksen ja kertoo, mistä virhe johtuu [9, 10, 16].



Kuva 8. Syklinen ohjelma, jossa käskyt suoritetaan toistuvasti peräjälkeen.

Itse järjestelmän käynnistämiseen ei tarvita käyttäjältä muuta kuin virran koneeseen kytkeminen. TwinCAT on ohjelmoitu käynnistymään Windowsin käynnistymisen rinnalla. Uudelleen käynnistyessään TwinCAT lataa viimeisimmän käytössä olleen ohjelman automaattisesti. Näin ollen itse ohjelmat voidaan määrittää myös käynnistymään virran kytkeytyessä päälle tai vaihtoehtoisesti manuaalikäynnistykseenä. Beckhoff suosittelee tietojen turvaamisen vuoksi kytkemään laitteiston UPS:iin, joka takaa prosessin suojattuun pysäytyksen esimerkiksi sähkökatkojen varalta. TwinCAT voidaan myös määrittää ajamaan prosessi turvallisesti turvalliseen tilaan käyttöjärjestelmän kaatuessa [9, 10, 16].

3.2.1 TwinCAT System Manager

TwinCAT System Manager on TwinCAT ohjelmiston järjestelmänhallintatyökalu. System Manageriin määritetään kaikki PLC- ja NC-puolen ohjauskäskyt, järjestelmässä kiinni olevat laitteet sekä komponenteissa kiinni olevat tulot ja lähdöt. System Managerin tarkoituksena on hallinnoida ja jakaa järjestelmän sisäiset viestit oikeisiin

osoitteisiin PLC-projektien ja fyysisten tulojen ja lähtöjen välillä. Tämä on toteutettu antamalla jokaiselle komponentille oma IP-osoite, jonka kenttäväylän tulo- ja lähtötiedot linkitetään PLC-ohjelmassa nimettyihin tulo- ja lähtötietokäskyihin. Käskyjä linkitettäessä TwinCAT hakee automaattisesti kaikki käyttäjän ohjelmaan määrittämät vapaana olevat tulot ja lähdöt [9, 10, 17].

Laitteen määrittely System Managerissa voidaan tehdä automaattisella komponenttien haulla, "Device Scan", tai manuaalisesti käsin. Automaattinen fyysisten laitteiden "skannaus" löytää kaikki tuetut ja oikein kytketyt komponentit ja väyläterminaalit. Mikäli käyttäjän tekemää PLC-ohjelmaa halutaan simuloida ilman fyysisesti kytkettäviä laitteita, on tulojen ja lähtöjen määrittäminen tehtävä manuaalisesti. Manuaalista laitteen määrittämistä käyttämällä käyttäjä joutuu itse valitsemaan tuettujen komponenttien listalta, mitä laitteita järjestelmään on kytketty tai tarkoitus kytkeä ja antamaan näille komponentteja vastaavat IP-osoitteet. Käsin komponentteja määrittäessä on riski yhdistää järjestelmään väärä laite, jolloin ohjelma ei toimi suunnitellulla tavalla ja saattaa antaa virheilmoituksen [9, 10, 17].

Järjestelmä käynnistetään System Managerin avulla ensiksi tarkastamalla, että käyttäjän luomassa ohjelmassa ei ole virheitä. Järjestelmänhallinta käy läpi niin PLC-logiikan kuin järjestelmään kytketyt laitteet ja niissä kiinni olevat tulo- ja lähtötiedot. Tämän jälkeen TwinCAT kysyy käyttäjältä vaihdetaanko suunnitteluvaiheessa käytetty "Config Mode"-tila "Free Run"-tilaan, joka pistää järjestelmän käyttövalmiuteen. Kytkettäessä käyttöjärjestelmä "Run"-tilaan voidaan System Managerista tarkastaa tulo- ja lähtötietojen arvot, jotka ovat näkyvillä numeroina ja graafisessa muodossa [9, 10, 17].

3.2.2 TwinCAT I/O

Beckhoff on integroinut TwinCATiin Windows-pohjaiset I/O-reaaliaika-ajurit, joiden avulla TwinCAT antaa käyttäjälle mahdollisuuden viedä tiedon muihin Windows-sovelluksiin. Ajurit mahdollistavat tiedon keruun fyysisiltä laitteilta tuloporttien kautta ja kerätyn datan viennin muihin ohjelmiin DLL:n, OPC:n tai OCX:n avulla. Sekä synkroninen että asynkroninen yhteys on tuettu. Synkroninen yhteys tarkoittaa jatkuvaa sisääntulevaa tietovirtaa, josta tunnistetaan merkki tai merkkijono. Asynkroninen tietovirta on hetkittäistä ja siinä tietovirrasta tunnistetaan yksi bitti, joka on sijoitettuna tunnistekehyykseen [17].

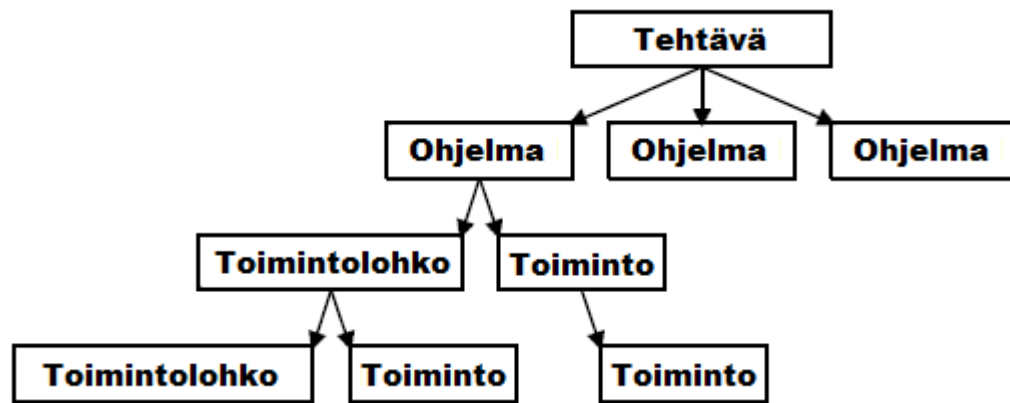
TwinCAT I/O tukee kaikkia tunnettuja kenttäväyliä; EtherCAT, Ethernet, Lightbus, PROFIBUS DP (master ja slave), PROFIBUS MC (liikkeen ohjaus), Interbus, CANopen, SERCOS interface, DeviceNet, PC-tulostinportti, USB, sarjaväyläkytkin BK8100:sta COM:iin, muistiliityntä PC-korteille (DPRAM) sekä SMB eli järjestelmänhallintaväylä, ja ne voidaan liittää samanaikaisesti osaksi järjestelmää [15].

3.2.3 TwinCAT PLC Control

TwinCAT PLC Control on Beckhoffin kehittämä ohjelmointikehitysympäristö. Ohjelma tarjoaa työkalut kahdeksanosaiselle IEC-61131-standardin mukaiselle logiikkaohjelmoinnille sekä virheiden etsinnälle (*"Debug"*). TwinCATissa on mahdollisuus pyörittää neljää eri PLC-projektia samanaikaisesti rinnakkain [15].

TwinCAT PLC-projekti koostuu ohjelmalohkoista, perustietotyypeistä ja muuttujista (esim. BOOL, INT, ARRAY), kirjastoista sekä projektiin liitetystä fyysisten komponenttien tuloista ja lähdöistä. Logiikkaohjelmoinnissa projektit ovat niin sanottuja tehtäviä, jotka jaetaan kolmeen toisistaan hieman poikkeavaan ohjelmalohkotyyppiin eli *"Program Organization Unit"* (POU); Program (ohjelma), Function Block (toimintolohko) ja Function (toiminto). Jokainen POU on erikseen nimetty, mikä mahdollistaa ohjelmalohkotyyppien kutsumisen toisesta ohjelmalohkosta. POU:t koostuvat sen sisäänrakennetusta logiikasta, joka on kirjoitettu jollain IEC-logiikkaohjelmointikielellä, sekä sitä koskevien muuttujien ilmoitusosasta. Tehtävä saattaa koostua yhdestä tai useammasta siihen liitetystä ohjelmasta, jotka käyttävät nimettyjä toimintoja ja toimintolohkoja (kuva 9) [15].

Ohjelmalohkotyyppien lisäksi TwinCATiin on erikseen liitettynä valmiiksi ohjelmoituja ohjelma- tai toimitolohkoja, joita kutsutaan kirjastoiksi. Kirjastot ovat automaatiassa yleisesti käytettyjä aliohjelmia, joiden tarkoituksena on helpottaa loppukäyttäjän työmäärää. Käyttäjä voi kutsua kirjastoja omasta ohjelmastaan, ja näin säästyä huomattavalta määrältä ohjelmointia. Kirjastot voivat sisältää esimerkiksi toimintolohkot erilaisille ajastimille, laskureille, liikkeenohjaus- ja PID-säätimille, suodattimille, lämpötilaohjaimille, rampeille tai liikenteenohjauksen RFID- ja telekommunikaatiotäydälyille [15].



Kuva 9. Beckhoffin TwinCAT-projektin rakennekaavio.

- Program POU on globaali pääohjelmatasolla käytetty ohjelmalohko, jota tehtävät voivat kutsua ilman esittelyä. Program säilyttää paikallisten muuttujien arvot jokaisen PLC-kierron välillä.
- Function Blokkeja voidaan verrata mikropiireihin, jotka sisältävät tietyn ohjatun toimenpiteen. Niitä käytetään määrittelemään tulomuuttujien (VAR_INPUT) ja lähtömuuttujien (VAR_OUTPUT) arvoja. Function Blokkeja kutsutaan esimerkiksi silloin, kun halutaan määrittää muuttuneesta tuloarvosta uusi lähtöarvo. Function Blockin tila tallennetaan jokaisen ohjelmakierron aikana ja tästä syystä niitä käytetään esimerkiksi ajastimina.
- Funktiota käytetään laskentafunktioina palauttamaan uusi laskettu arvo sisäänsyötetyn arvon (VAR_INPUT) perusteella. Funktiot eivät säilytä paikallisten muuttujien arvoja PLC-ohjelmakierron aikana ja tästä syystä esimerkiksi ajastimia ei voi ohjelmoida Function-lohkoihin.

Jokainen ohjelma kirjoitetaan käyttäen IEC-61131-3-standardiin perustuvaa logiikkaohjelmointikieltä. Kieliä on yhteensä valittavissa kuusi, joista kaksi on tekstipohjaisia ja neljä grafiikkapohjaisia.

Teksiin perustuvat kielet:

- IL ("Instruction List"), käskylista
- ST ("Structured Text"), strukturoitu teksti

Graafiset kielet:

- FBD ("Function Block Diagram"), toimintalohkokaavio
- LD ("Ladder Diagram"), relekaavio
- SFC ("Sequential Flow Chart"), sekvenssikaavio
- CFC ("Continuous Function Chart"), sekvenssikaavion ja toimintalohko-kaavion välimuoto

Käskylista (IL) koostuu sarjasta erilaisia SET ja RESET-käskyjä. Jokainen käsky alkaa uudelta riviltä ja sisältää operaattorin sekä sille annetut vertaaluoperaattorit. Käskylista on tarkoitettu yksinkertaiseen ohjelmointiin ja monimutkaisten laskutoimitusten laskenta on vaikeaa [15].

```
CAL      ZAB(IN:=FALSE)
LD       TIME_IN
ST       ZAB.PT
CAL      ZAB(IN:=TRUE)
JMP      end
```

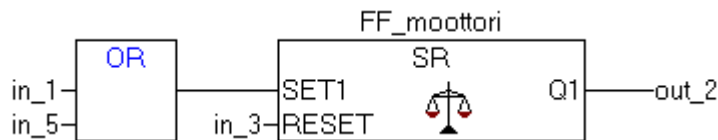
Esimerkkikoodi 1: Käskylistalla toteutettu ohjelma [15].

Strukturoitu teksti (ST) on helposti luettavaa ja ymmärrettävää ohjelmointikieltä, joka on pascal/basic-mukainen ohjelmointikieli. Se koostuu ehdoista (IF, THEN, ELSE, jne.) sekä loopeista (WHILE, DO, FOR, jne.), ja stukturoidun tekstin avulla on helppo kirjoittaa vaativia matemaattisia laskutoimituksia [15].

```
(*Hissi nousee niin kauan ylös kunnes se saavuttaa tavoitearvonsa "value"*)
IF hissin_sijainti < value THEN
  REPEAT Hissi_ylös;
  UNTIL OK = TRUE
END_REPEAT;
END_IF;
```

Esimerkkikoodi 2: Stukturoidulla tekstillä toteutettu ohjelma [15].

Toimintalohkokaavio (FBD, kuva 10) on graafinen kieli, joka perustuu määriteltyihin toimintalohkoihin. Lohkot perustuvat niihin tuleviin tulosignaaleihin ja lähtöihin sekä lohkojen sisällä tapahtuviin toimintoihin. Toimintalohkokaavion logiikan seuraaminen on helppoa ja täten niitä käytetään usein ohjelman päätasolla, josta kutsutaan toisia aliohjelmiksi [15].



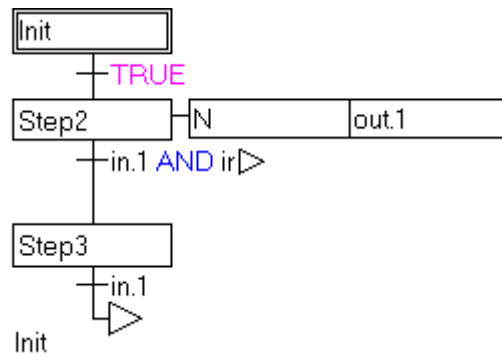
Kuva 10. Toimintalohkokaaviolla toteutettu ohjelma [15].

Relekaavion (LD, kuva 11) toimintaperiaate muistuttaa sähköistä virtapiiriä. Relekaavion loogiset piirit muodostuvat vasemmalta oikealle etenevistä janoista, joiden väliin logiikan toiminnot on sijoitettu. Toiminnot koostuvat yksinkertaisista "ON/OFF" tiloista, jotka vastaavat boolean-arvoja "TRUE/FALSE". Relekaavioon voidaan myös liittää toimintalohkokaaviolla tehtyjä ohjelmalohkoja [15].



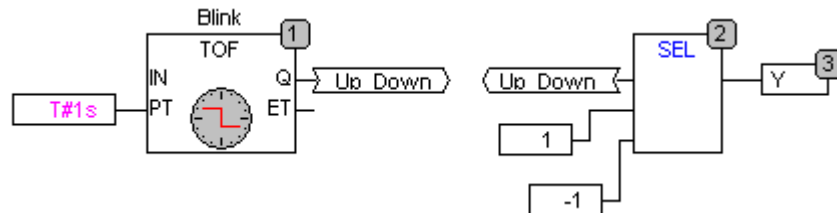
Kuva 11. Relekaaviolla toteutettu ohjelma [15].

Sekvenssikaavio (SFC, kuva 12) on graafisesti toteutettu ohjelmointikieli, jossa ohjelma etenee "stepeissä" eli askelissa kronologisessa järjestyksessä. Askeleet ovat ohjattuja toimintoja, joita suoritetaan niin pitkään, kunnes seuraavaan askeleeseen tarvittavat ehdot käyvät toteen. Askeleet voivat koostua esimerkiksi TRUE/FALSE-ehdoista, laskutoimituksista tai ajastimista [15].



Kuva 12. Sekvenssikaaviolla toteutettu ohjelma [15].

Jatkuva toimintalohko kaavio (CFC, kuva 13) on eräänlainen toimintalohkokaavio (FBD) laajennus, joka ei ole sidottuna yksittäisiin ruutuihin, vaan lohkoja voi sijoittaa vapaasti ohjelmointi-ikkunassa [15].



Kuva 13. CFC:llä toteutettu ohjelma [15].

3.2.4 TwinCAT NC PTP, -I ja -CNC

TwinCAT NC PTP-, NC I- ja CNC-liitännäiset on tarkoitettu numeerisesti ohjattujen työstökoneiden automaation ohjelmoimiseen. Sovelluksiin kuuluvat valmiiksi ohjelmoidut työstökoneen akselien tai synkronoitujen akseliryhmien ohjaintoiminnot ja niihin liittyvät rajoitukset. Ohjaintoiminnoilla ja niiden rajoituksilla tarkoitetaan akselien paikannusta 3D-ulottuvuudessa sekä nopeus-, kiihtyvyys- ja liikkeellelähtörajoituksia. NC PTP tulee sanoista "Numerical Control Point-to-Point", joka tarkoittaa työstökoneen pisteestä pisteeseen ohjausta. Pisteohjauksessa kone ajetaan tiettyyn asemaan kappaleeseen nähden ja suoritetaan siinä pisteessä tapahtuva lineaarinen koneistus, esimerkiksi poraus. NC I, eli "Numerical Control Interpolation", tarkoittaa työstökoneen interpolaatio-ohjausta. Ohjelmalle annetaan tällöin kaksi pistettä, joiden välillä halutaan koneistuksen tapahtuvan. Interpolaatiota hyödynnettäessä voidaan työstökoneella ajaa jokaisen akselin suuntaan samanaikaisesti. Tämä mahdollistaa kappaleen työstämisen 3D-maailmassa. NC I voidaan myös ohjelmoida ajamaan kolmea eri pääakselia ja viittä

eri lisäakselia, kuten työstöpöydän kiertoratoja, samanaikaisesti. TwinCAT CNC on suunniteltu ohjaamaan työstökeskuksia PLC:n sekä siihen erikseen liitetyn CNC-kernelin avulla. Kernelillä tarkoitetaan käyttöjärjestelmän ydintä, joka määrittelee järjestelmän rakenteen, ominaisuudet sekä luokitukset [15].

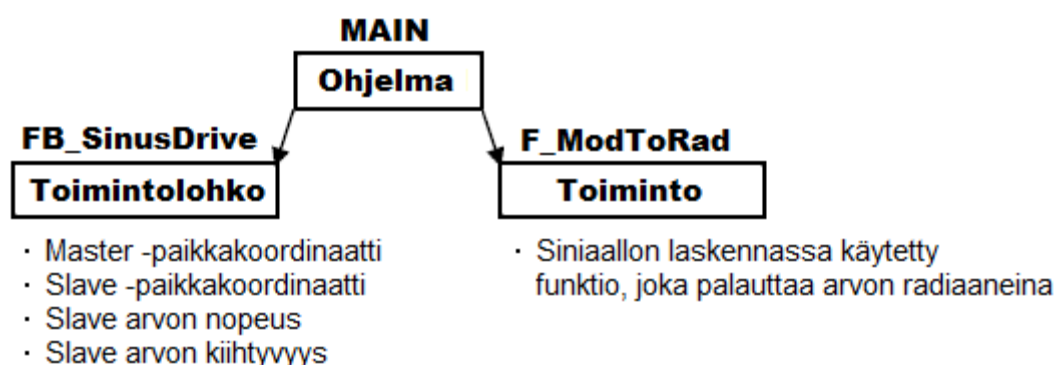
3.2.5 TwinCAT ScopeView

TwinCAT Scope2 on analysointiin tarkoitettu lisäosa, joka näyttää graafisen arvion järjestelmän tilasta sekä muuttujien arvoista. Scope2 on jaettu kahteen eri työkaluun; ScopeView on graafinen työkalu signaalin analysointiin ja ScopeServer on tarkoitettu tiedonkeruuseen ja tallentamiseen [15].

4 SinusDrive

SinusDrive on Beckhoffin suunnittelema TwinCAT-projekti, jonka tarkoituksena on simuloida lineaariservon käyttäytymistä ja sen liikerataa toistuvassa sinimuotoisessa ajan funktiona muuttuvassa kuormituksessa.

Ohjelma rakentuu kolmesta eri POUsta; MAIN, FB_SinusDrive ja F_ModToRad, kuten kuvassa 14. Projektin MAIN-osa on päätason ohjelma, joka on kirjoitettu strukturoidulla tekstillä, ja se hoitaa käskytystä aliohjelmien välillä. MAIN hoitaa heti ohjelman käynnistyessä kaikkien muuttujien alustuksen, tunnistaa FB_SinusDriven sekä F_ModToRadin omiksi ohjelmikseen ja antaa kummallekin arvon TRUE. Tämän jälkeen ohjelma aloittaa lineaariservon paikan laskennan.

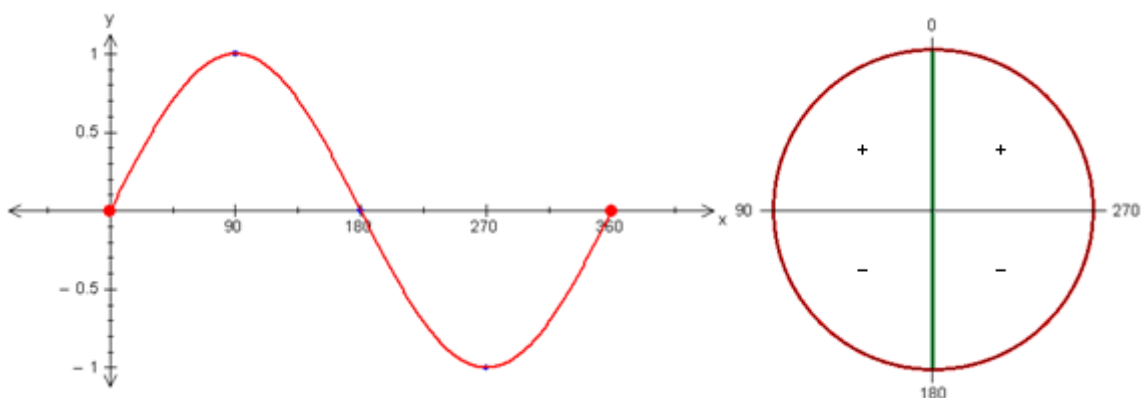


Kuva 14. Kuvaus SinusDrive-projektin rakenteesta.

FB_SinusDrive on MAINin aliohjelmana toimiva ohjelmaloikka, joka on kirjoitettu strukturoidulla tekstillä. FB_SinusDrive on rakennettu CASE-rakennetta käyttäen. Se perustuu yhteen tarkasteltavaan ehtolauseeseen, jonka perusteella haaraudutaan johonkin CASE-rakenteen haaraan. Haarat voivat pitää sisällään useita eri lauseita, joita suoritetaan niin pitkään, kunnes CASE-haarassa poistumiseen tarvittavat ehdot astuvat voimaan. FB_SinusDriven CASE-rakenteen nollatila on funktiolohkon muuttujien ja aloitusarvojen alustukseen tehty vaihe, jonka tarkoituksena on laittaa ohjelman asetusarvojen generointi päälle. CASE-rakenteen toinen tila laittaa kuvitteellisen lineaariservon asemoinnin päälle.

Rakenteen kolmas tila on varsinainen ajotila, missä lineaariservon simulaatio tapahtuu. Ohjelmassa on kaksi koko ajan muuttuvaa pääarvoa, Master ja Slave, jotka pyrkivät havainnollistamaan lineaariservon paikan sijaintia. Tämä on toteutettu ohjelmassa siten, että kumpikin pääarvo pyrkii seuraamaan harmonisen siniaallon pisteitä ympyräsektorilla.

Jokaista suunnattua kulmaa vastaa jokin tietty piste ympyräsektorilla, joka on mahdollista esittää myös kuvan 18 oikeanpuoleisen x- ja y-sektorin mukaisessa taulukossa. Sin saa positiivisia kasvavia arvoja $0^\circ \dots 90^\circ$ välillä, ja positiivisia väheneviä arvoja välillä $90^\circ \dots 180^\circ$. Tarkasteltavan pisteen ollessa 90° asteen kohdalla y-akselilla siniaalto saa arvon 1. 180° asteen kohdalla käyrän pisteet alkavat saada negatiivisia väheneviä arvoja aina 270° asteeseen saakka, joka vastaa y-akselilla arvoa -1. $270^\circ \dots 360^\circ$ välillä arvot alkavat taas lähestyä nollaa. Kuva 15 havainnollistaa SinusDriven master- ja slave-arvojen generointia graafisesti.

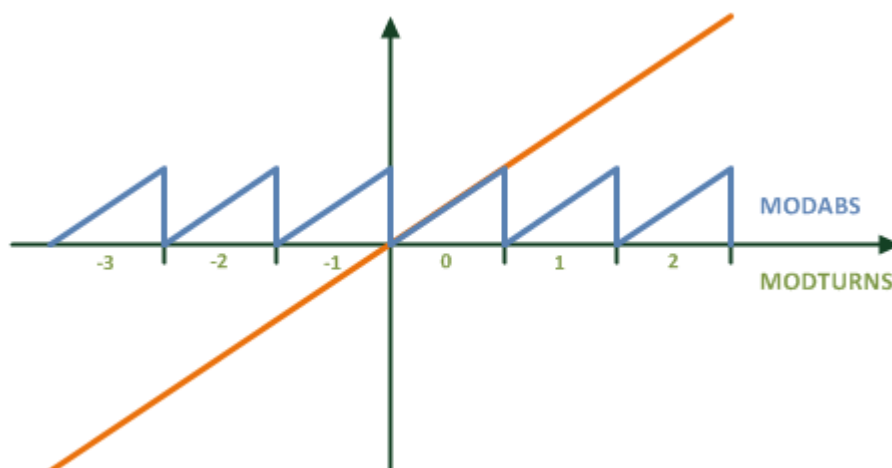


Kuva 15. Punainen viiva havainnollistaa SinusDriven master-arvoa ja vihreä viiva ohjelman slave-arvoa sinimuotoisella kuormitusamplitudilla.

FB_SinusDrivessa Masterin arvo seuraa kokoajan yksikköympyrän pystysuoraa viivaa. Lähtöarvoksi sille annetaan origon nollapiste, kunnes saavutetaan arvo 1. Tämän jälkeen arvo lähtee pienenemään, kunnes saavutetaan arvo -1, jonka jälkeen arvoa taas lähdetään kasvattamaan. Ohjelmassa Masterin arvo on tallennettu reaalitykkömuuttuutaan fMasterRelativeModuloPosition, joka on laskettu seuraavalla kaavalla:

$$fMasterRelativeModuloPosition := \text{MODABS}(\text{settingToAxe} - fMasterStartPos, fModuloFactor);$$

missä MODABS on jakojäännöksessä jäljelle jääneen osan itseisarvo
 esimerkiksi $\text{MODABS}(-400.56, 360) = 40.56$
 settingsToAxe seuraa koko ajan muuttuvaa ympyrän asteikkoa $0^\circ \dots 360^\circ$
 fMasterStartPos on Masterin alkuasema eli 0°
 fModuloFactor on täysi ympyräkierros eli 360° , joka saadaan kaavasta $2 * \pi$.



Kuva 16. MODABSin periaate kuvaajan muodossa [15].

Slave:n reaaliarvo paikkakoordinaatti fNewSlavePos lasketaan siniaalto generaattorilla seuraavaa kaavaa käyttäen:

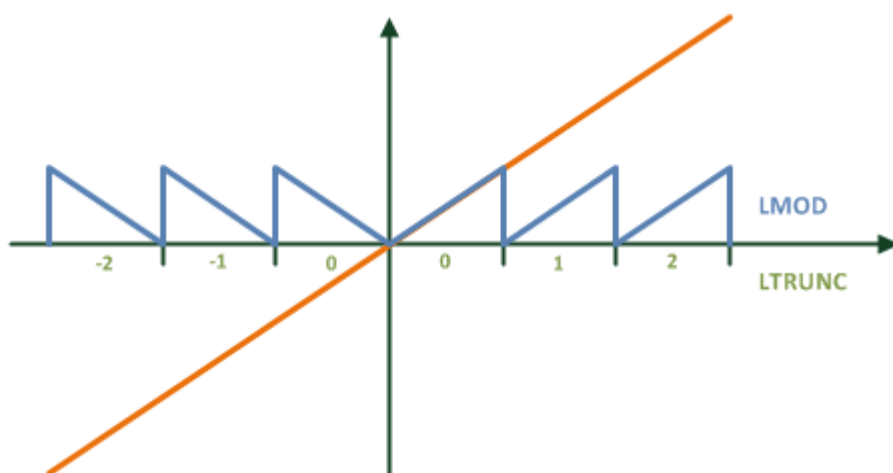
$$fNewSlavePos := \text{SIN}(F_ModToRad(fValue := fMasterRelativeModuloPosition, fModuloFactor := fModuloFactor)) * fAmplitude;$$

Slaven paikkakoordinaatti on saatu laskemalla aliohjelmalle F_ModToRad syötettävät fValue (sama kuin fMasterRelativeModuloPosition arvo) ja fModuloFactor ($2 * \pi$) arvot. Aliohjelma F_ModToRad palauttaa lasketun arvon, joka kerrotaan sinillä ja värähdystaajuudella fAmplitude eli 1.

F_ModToRad on SinusDrive-projektin toinen strukturoidulla tekstillä kirjoitettu aliohjelma, jolle FB_SinusDrive lähettää kutsuja arvojen laskemista varten antamalla sille alkuarvot. F_ModToRad-aliohjelma palauttaa alkuarvojen perusteella lasketun uuden arvon takaisin FB_SinusDrivelle. Aliohjelmassa on samanniminen muuttuja F_ModToRad, jota käytetään jakojäännöksen 360 asteesta muuttamiseksi radiaaneiksi seuraavasti:

$$F_ModToRad := (L\text{MOD}(f\text{Value}, f\text{ModuloFactor}) / (f\text{ModuloFactor}/L\text{REAL}\#2)) * \text{PI};$$

missä LMOD on jakojäännöksessä jäljelle jäänyt osa, esimerkiksi $L\text{MOD}(-400.56, 360) = -40.56$.



Kuva 17. LMOD-periaate kuvaajan muodossa [15].

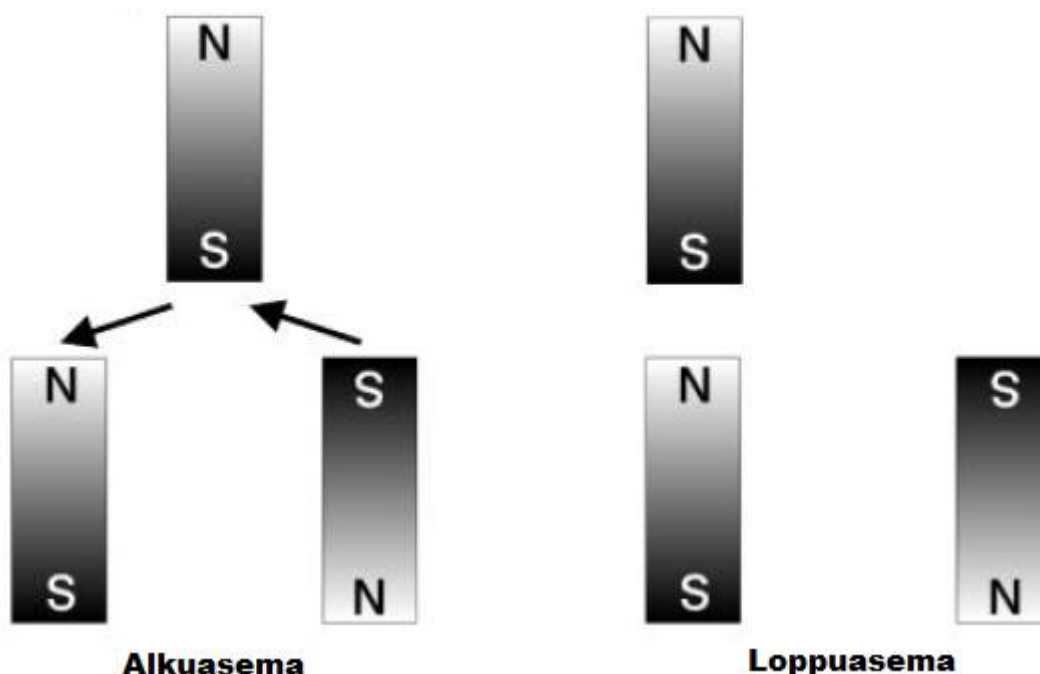
5 Lineaarinen servomoottori

Tyypillisesti teollisuudessa on jo pitkään lineaarinen liike toteutettu hammastangolla, hammashihnalla tai kuularuuvia käyttämällä. Näillä menetelmillä mekaanisten osien määrä laitteistossa lisääntyy, mikä tarkoittaa, että laitteistoa tarvitse voidella ja huollon tarve näin ollen lisääntyy. Lineaarimoottorilla saadaan toteutettua samanaikaisesti lineaarinen liike, jolla on suuri nopeus ja voima, liikeradat voivat olla pitkät sekä tarkkuus on suuri. Eduiksi voidaan myös laskea puhtaus ja meluttomuus. Suurena haittapuolena on kuitenkin pitkään ollut laitteistoon tarvittavien kestopagneettimateriaalien hinta. Sovelluksesta riippuen hinta saattaa olla jopa kolmeviisi kertaa perinteisellä moottorilla toteutettua mekaanista ratkaisua kalliimpi [12].

5.1 Toimintaperiaate

Lineaarimootorin toimintaperiaate perustuu magnetismiin, jossa kaksi magneettia on asetettu vastakkain, ja näin ne muodostavat voiman toistensa välille. Riippuen magneettien napaisuudesta ne joko vetävät tai hylkivät toisiaan. Magneettien ollessa samannapaisesti vierekkäin ne pyrkivät työntämään toisiaan pois päin. Erinapaisesti vierekkäiset magneetit taas vetävät toinen toisiaan yhteen.

Ajateltaessa kuvan 18 mukaista tilannetta, missä kaksi magneettia alhaalla on sijoitettu vierekkäin, mutta navallisesti toisinpäin. Magneettien veto- ja poistovoiman takia ylhäällä oleva kolmas magneetti pyrkii näin siirtymään vastakkaisnapaisen magneetin viereen. Lineaarimootori hyödyntää periaatetta siten, että yläpuolella oleva kestopagneetti vaihdetaan käämitettyyn sähkömagneettiin, jonka napaisuutta vaihdetaan koko ajan vaihtovirran avulla ja näin ollen sähkömagneetti pysyy koko ajan liikkeessä. Sähkömagneetin voimakkuuteen vaikuttaa sähkövirran ampeerit, käämin sähköjohtimen kierrosluku sekä sydänmateriaali. Tavallisesti sydänmateriaalina on käytetty rautaa, jossa virran suunnan muutos saa aikaan johtimen ympärille muuttuvan magneettivuon [8, 13].



Kuva 18. Liikkeen periaate [15].

Lineaarimoottoreita on kahta eri tyyppiä; lineaarinen synkronimoottori (LSM) sekä lineaarinen induktiomoottori (LIM). Tässä työssä keskitytään lineaarisen synkronimoottorin rakenteeseen, sillä kouluun koestuslaitteistoksi suunniteltu Beckhoffin AL20xx-sarjan moottorit ovat lineaarisia synkronimoottoreita. Synkronisessa moottorissa mekaaninen liike on samanaikainen magneettikentän kanssa. Täten voidaan liikkuvien osien nopeus laskea kaavasta:

$$v = v_s = 2f\tau = \frac{\omega}{\pi}\tau \quad (4)$$

missä v on liikkuvan kappaleen nopeus

v_s on magneettikentän nopeus

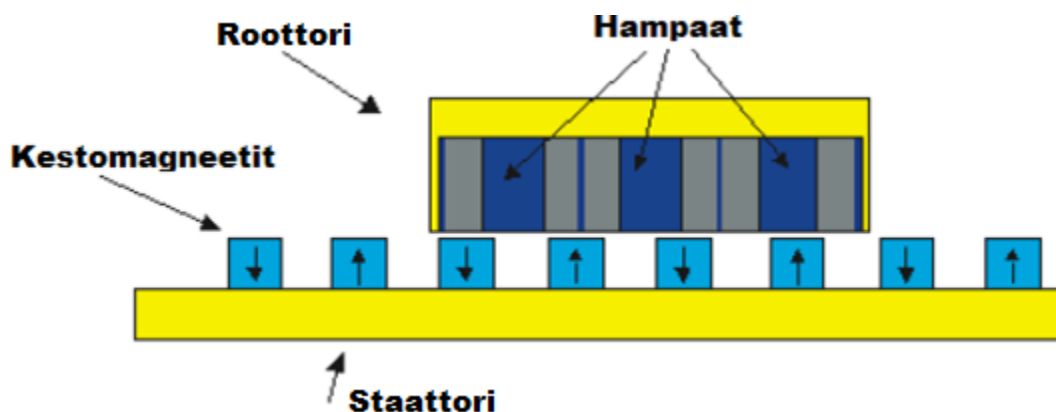
f on sisääntulotaajuus

ω on kulmataajuus

τ on napajako.

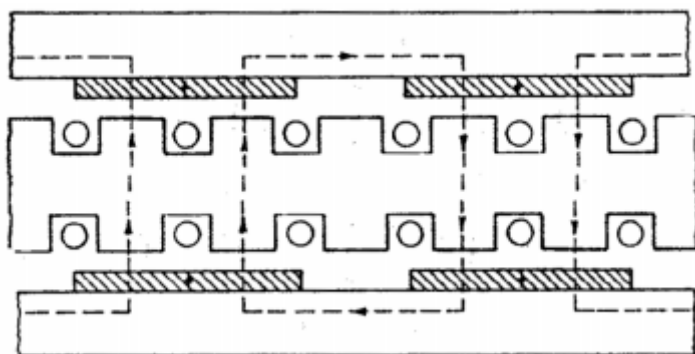
5.2 Synkronisen lineaarimoottorin rakenne

Synkronisesta lineaarimoottorista on useita variaatioita, jotka voidaan jakaa tasomaisiin, urallisiin ja urattomiin, yksipuolisiin tai kaksipuolisiin sekä sylinterimäisiin moottoreihin. Jokaiselle kuitenkin on ominaista, että ne rakentuvat kahdesta pääosasta; useista alustassa eli staattorissa kiinni olevista kesto- tai sähkömagneeteista, joissa on muuttuva reluktanssi, ja monivaiheisesta käämitetystä roottorista, joka tuottaa liikkuvan magneettikentän. Kuvassa 19 on synkroninen tasomainen yksipuolinen lineaarimoottori, jossa roottori liikkuu staattorin päällä lineaarisessa suunnassa sivuilta laakereilla tuettuna. Laakerit ovat ainoa mekaaninen osa lineaarimoottorissa, joka yksipuolisen rakenteensa ansiosta on helppo jäähdyttää. Jäähdytykseen on useita eri ratkaisuja, mutta yleisimmin käytetään joko ilmaa tai vettä. Vedellä jäähdytettäessä lineaarimoottorista saadaan suurempi jatkuva teho. Hyvän jäähdytyksen ansiosta yksipuoleinen lineaarimoottori sopii suurien voimien liikuttamiseen [8, 13].



Kuva 19. Synkronisen tasomaisen yksipuolisen lineaarimoottorin rakenne [15].

Kaksipuoleisessa lineaarimoottorissa (kuva 20) roottori on kahden vastakkain sijoitetun käämityksen välissä tai roottorin ollessa käämitetty sivuilla on magneettipari. Näin saadaan aikaiseksi voimakkaampi magneettikenttä, mutta kaksipuoleisessa moottorissa jäähdytys on ongelma. Tämän vuoksi niitä käytetään usein tarkkuutta ja nopeutta vaativissa sovelluksissa [8, 13].

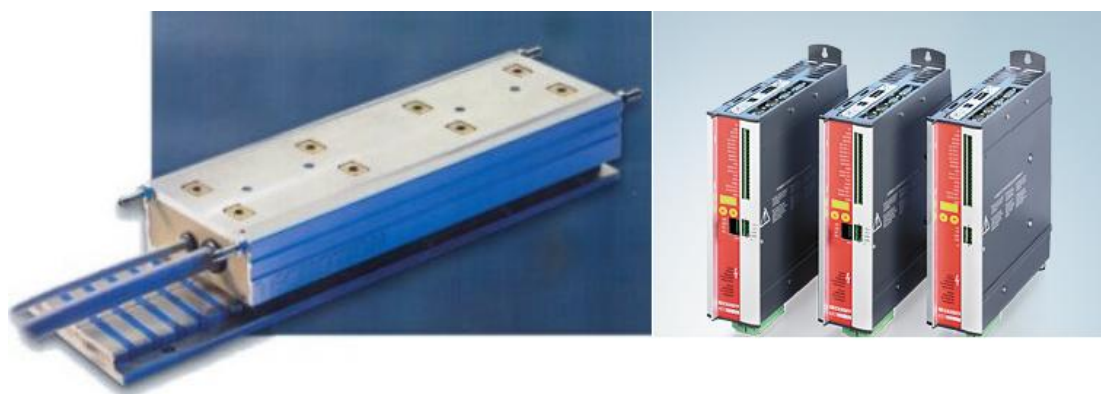


Kuva 20. Kaksipuoleisen lineaarimoottorin magneettikentän kulku [8].

5.3 Beckhoff AL20xx ja AX2xxx

Beckhoffin AL20xx-lineaarimoottorisarja koostuu kahdeksasta 80 cm pitkästä voimansiirrotaan erikokoisesta kolmetahtisesta synkronisesta servomoottorista. Roottorissa on urallinen laminoitu sydän, jossa on upotetut kuparikäämit. Tämä mahdollistaa kaikkien moottoreiden käytön samalla magneettilevyllä, sekä niitä voidaan myös yhdistää halutulla tavalla. Lisäksi roottori on isku- ja roiskesuojattu IP 64-luokituksen mukaisesti, mikä tarkoittaa että roottori on pöly- ja roisketiivis [16].

Jotta lineaarimoottori saataisiin yhdistettyä toimivaksi kokonaisuudeksi TwinCAT-ohjelmistoon, tarvitaan laitteiston väliin digitaalisen signaalin lukemiseksi koneella ohjainyksikkö. Beckhoffin AX2000/AX5000-sarjan servo-ohjaimet on suunniteltu toimimaan mutkattomasti AL2000-sarjan lineaaristen servomoottoreiden kanssa. Ohjain mahdollistaa lineaariservon voiman, nopeuden ja paikan säätöominaisuuksien tarkan kontrolloimisen [17].



Kuva 21. Beckhoff AL20xx-lineaarimoottori sekä AX2xxx-servo-ohjain komponentti [16].

AX5000-sarjan ohjaimissa on sisällä 32 bittinen mikroprosessori, jonka alhaisin näytteenottoaika on 64 μ s. Komponentti on mahdollista yhdistää järjestelmään käyttäen joko EtherCAT, PROFIBUS, SERVO interface, CANopen, DeviceNet, Ethernet tai Lightbus liitäntöjä [16].

5.4 Servon mitoitus ja mahdollinen kiinnitys

Beckhoffilta saatavan lineaariservon mukana ei tule kiinnitysalustaa, joten roottoriin on rakennettava työtaso, johon koestettavan materiaalin saa kiinni. Kuvassa 22 on Beckhoffin valmistama lineaariservon testipenkki, jossa roottoriin on kiinnitetty alumiininen työtaso. Kiinnitysalustan, johon servo kytketään tulee olla tukeva. Liikkuvat maksimivoimat voivat kasvaa suuriksi, jolloin kiinnitysalustalta vaaditaan tarvittavaa dynaamista jäykkyyttä. Tarkkojen mittaustulosten saamiseksi rakenteen tulisi olla mahdollisimman hyvin iskuja ja tärähdyksiä vaimentava, joten mikäli runko pultataan lattiaan tai painavaan pöytään kiinni, kannattaa alle laittaa iskuja ja tärinää vaimentava kumikerros. Rakenteen teko painavasta materiaalista auttaa myös osaltaan vaimentamaan värähtelyä. Tämän takia useat NC-sorvit on rakennettu valurauta-alustalle.



Kuva 22. Beckhoffin valmistama lineaariservon testipenkki [16].

Beckhoff toimittaa roottorin mukana laakerit, jotka on suunniteltu asennettavaksi kahdelle magneettilevyn eli staattorin viereiselle kiskolle. Laakerit ovat kokoonpanon ainoa kuluva osa ja ne on suunniteltu mahdollisimman pienen kitkan varmistamiseksi. Laakereiden ja kiskojen avulla roottorin ja staattorin välinen ilmarako on suunniteltu idealliseksi.

Liite 1 kuvaa kumille tehtyä hystereesimittausta 80 N:n alaisessa toistuvassa rasituksessa, jossa rasituksen taajuus on 10.043 Hz. Mikäli Metropolia Ammattikorkeakoulun tiloissa halutaan suorittaa vastaava koestus kysytyllä 20 Hz:n taajuudella, olettaen liikuteltavan massan kokonaispainoksi 5 kg, servon mitoitusta varten on laskettava systeemiin massan tuoma lineaarinen hitausvoima kiihdytyksen hetkellisessä maksimiarvossa, eli siniaallon kohdassa 90 astetta:

$$a = -A\omega^2 \cos\omega t = A\omega^2 \quad (5)$$

Kiihtyvyydeksi saadaan 20 Hz:n taajuudella $a = 2,45037 \text{ m/s}^2$ käyttämällä säteenä (A) liitteen 1 kokeen mukaista kokonaismatkaa $d = 0.39 \text{ mm}$. Tästä voidaan laskea massasta kiihdytyksen aikana aiheutuva hitausvoima kaavalla:

$$F = ma \quad (6)$$

Kiihdytyksen aikaiseksi hitausvoimaksi saadaan näin ollen 5 kg:n massalla $F = 12,252 \text{ N}$, johon tulee lisätä hystereesin mittauksessa tarvittava 80 N rasitus.

Johtopäätöksenä todetaan, että mikäli Metropolia Ammattikorkeakoululle hankintaan lineaariservomoottori, Beckhoffin sopiva lineaariservo on AL2009 kolmivaihe synkroninen lineaarimoottori, jonka luvataan tuottavan 225 N jatkuvan kuormitusvoiman ilmajäähdytteisesti. Nestejäähdytyksellä päästään kyseisellä moottorilla 315 N. Moottorille suositeltu servo-ohjain Beckhoffin mukaan on AX5103 [16, 17].

6 Yhteenveto

Tämän insinööriyön tarkoituksena oli selvittää hystereesin mittausta elastisessa materiaalissa ja miten se käytännössä voidaan toteuttaa. Työssä käytetty simulaatio-ohjelma on pelkistetty malli, kuinka lineaariservo käytännössä tulisi toimimaan. Mallissa ei näin ollen ole otettu huomioon kaikkia fysikaalisia ominaisuuksia, jotka käytännön testitilanteessa saattaisi tulla vastaan. Mikäli koulun laboratorioon hankitaan koestuslaitteisto hystereesin mittausta varten on huomioitava laitteiston voiman tarve, laitteiston tarvitsema tukeva kiinnitys ja jäähdytys sekä mittaustulosten analysointi.

Lähteet

- 1 Dowling, N.E. 1999. Mechanical Behavior of Materials. Engineering Methods for Deformation, Fracture and Fatigue. 2. p. Upper Saddle River, Prentice Hall, USA: Pearson Education, Inc.
- 2 Salmi, T. ja Virtanen, S. 2008. Materiaalien mekaniikka. Tampere: Pressus Oy.
- 3 Seppälä, J. 2005. Polymeeritekniikan perusteet. Helsinki : Hakapaino Oy.
- 4 Aumala, O. 1989. Mittaustekniikan perusteet. Helsinki: Hakapaino Oy.
- 5 Törmälä, P, Järvelä, P & Lidberg, J.J. 1983. Polymeeritiede ja muovitekniikka. Osa II. Helsinki: Kyriiri.
- 6 Tammela, V. 1989. Polymeeritiede ja muovitekniikka. Osa III. Helsinki: Hakapaino Oy
- 7 Vesamäki, H. 2007. Lastuavan työstön NC-ohjelmointi. Helsinki: Kopio-Niini Oy.
- 8 Hirvonen, M. 2001. Sähköisen lineaariservomoottorijärjestelmän dynamiikan simulointi. Diplomityö. Lappeenranta: Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu, konetekniikan osasto.
- 9 Pösö, J.M. 2010. Tutkimusmatka saksalaiseen liikkeenohjaukseen. Insinöörityö. Satakunta: Satakunnan ammattikorkeakoulu, Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma.
- 10 Kuusisto, P. 2008. CAN-väylä TwinCAT-ympäristössä. Insinöörityö. Tampere: Tampereen ammattikorkeakoulu, Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma.
- 11 Merikoski, S. 2001. Kumin sekoitusprosessin mallintaminen neuro-sumealla menetelmällä. Tampere: Tampereen teknillinen korkeakoulu, Sähkötekniikan koulutusohjelma.
- 12 Leino, R. Lineaarimoottori yleistyy vihdoinkin. Tekniikka ja Talous 2005. [Verkkodokumentti] [Viitattu 29.4.2013]. Saatavissa: <http://www.tekniikkatalous.fi/energia/article23653.ece>
- 13 Kiviaho, E. Sähköiset lineaarimoottorit. Tutkielma. Tampere: Tampereen teknillinen yliopisto. [Verkkodokumentti] [Viitattu 9.4.2013]. Saatavissa: <http://www.ele.tut.fi/teaching/ele-3350/lineaarimoottorit.pdf>

- 14 Kumiteollisuus ry.[Verkkodokumentti] [Viitattu 15.3.2013] Saatavissa: <http://www.kumiteollisuus.fi/fin/kumitietoutta/>
- 15 Beckhoff Automation GmbH Information System. [Verkkodokumentti] [Viitattu 9.3.2013] Saatavissa: http://infosys.beckhoff.com/english.php?content=../content/1033/tcinfosys/html/tcinfosys_news.htm&id=11507
- 16 AL20xx | Linear Servomotors - Beckhoff Automation GmbH. [Verkkodokumentti] [Viitattu 20.4.2013] Saatavissa: http://www.beckhoff.com/english.asp?drive_technology/al20xx.htm?id=55697131085
- 17 AX5000 | Digital Compact Servo Drives - Beckhoff Automation GmbH. [Verkkodokumentti] [Viitattu 13.5.2013] Saatavissa: http://www.beckhoff.com/english.asp?drive_technology/al20xx.htm?id=55697131085
- 18 Rubber tree - Encyclopedia Britannica. [Verkkodokumentti] [Viitattu 13.5.2013] Saatavissa: <http://www.britannica.com/EBchecked/media/109292/Latex-being-extracted-from-a-rubber-tree>

Hystereesin mittaus

Erään kumimateriaalin hystereesin koestus 80 N rasituksessa mittauksen taajuuden ollessa 10.043 Hz.

